光电智能识别与感知

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260624002

短距离相干电外差激光雷达测速系统及信噪比特性分析

王子文,杨贺迪,籍浩恺,王鹏源,白　岩*

(东北林业大学 控制与信息工程学院,哈尔滨 150040)

摘　要: 针对短距离场景下运动目标速度测量对探测灵敏度、信号处理灵活性和抗干扰能力的需求,设计了一种基于相干电外差探测的激光雷达测速系统。系统采用1 550 nm窄线宽激光器作为光源,利用双平行马赫-曾德尔调制器实现光载射频调制,并通过平衡探测器获取回波光与本振光的相干拍频信号。后端引入软件无线电平台,完成射频信号产生、拍频信号采集、I/Q正交解调和频谱分析。建立了平衡探测器输出实信号经软件无线电转换为复数基带信号前后的信噪比模型,理论分析表明,在理想条件下软件无线电处理过程不引入额外信噪比损失。搭建短距离测速实验平台,以风扇叶片作为运动目标进行实验。实验结果表明,系统能够稳定提取目标多普勒频移信息,验证了所提系统用于短距离目标测速的可行性。该研究为近距离相干激光雷达测速系统的小型化和数字化处理提供了参考。

关键词: 激光雷达;软件无线电;短距离目标测量;相干探测技术;多普勒效应

中图分类号: TN958;TN247　**文章编号:** 1001－5868(2026)05－0814－06

Short-Range Coherent Heterodyne LiDAR Speed Measurement System and Signal-to-Noise Ratio Characteristic Analysis

WANG Ziwen, YANG Hedi, JI Haokai, WANG Pengyuan, BAI Yan

(**College of Control and Information Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, CHN**)

Abstract: A laser radar velocimetry system based on coherent heterodyne detection was designed to satisfy the requirements of moving target velocity measurement in short-range scenarios, such as detection sensitivity, signal processing flexibility, and anti-interference capability. The system used a 1 550 nm narrow-linewidth laser as the light source and dual parallel Mach-Zehnder modulators to achieve optical radio frequency modulation. It acquired the coherent beat signal between the echo light and the local oscillator light using a balanced detector. A software-defined radio (SDR) platform was introduced at the backend to generate radio frequency signals, acquire beat signals, perform I/Q orthogonal demodulation, and conduct spectral analysis. A signal-to-noise ratio model was established for the real-valued output of the balanced detector before and after conversion into complex baseband signals by the SDR. Theoretical analysis demonstrated that, under ideal conditions, SDR processing does not introduce additional signal-to-noise ratio loss. A short-range velocimetry experimental platform was built using fan blades as moving targets for validation. Experimental results demonstrated that the system can stably extract Doppler frequency shift information from the target, confirming the feasibility of the proposed system for short-range target velocity measurement. This

收稿日期:2026－06－24.

*通信作者:白　岩

study provides a reference for miniaturization and digital signal processing in close-range coherent LiDAR velocimetry systems.

Key words: LiDAR; software defined radio; short-range target measurement; coherent detection technology; Doppler effect

0　引言

激光雷达因具有方向性好、测量精度高和抗电磁干扰能力强等特点，已广泛应用于风场探测、运动目标测速、自动驾驶感知和工业测量等领域[1-2]。按照探测方式不同，激光雷达可分为直接探测和相干探测两类。直接探测系统结构相对简单，但其主要利用回波强度信息，在光电转换过程中无法保留光载波的相位信息，且难以直接解析回波的光学多普勒频移（频率偏移量）；相干探测通过本振光与回波光拍频，可获得目标运动引起的多普勒频移信息，具有较高的速度灵敏度和较强的弱信号检测能力[3-5]。

激光和微波同为电磁波，仅是波段不同。得益于激光相干性的不断提高，相干探测体制激光雷达的工程实现成为可能。现有的相干多普勒激光雷达研究多集中于中远距离风场探测；而在 0.1～30 m 短距离应用场景中，目标距离近、回波时间短、环境杂散反射明显，对系统的调制方式、信号采集能力和后端处理灵活性提出了更高要求[6]。传统基于独立射频源和高速采集卡的系统存在硬件结构复杂、参数调整不便和后端处理链路分散等问题。软件无线电具有频率、带宽和采样参数可配置的特点，能够在同一平台上实现射频信号产生、数据采集和数字正交解调，为短距离相干激光雷达系统提供了一种灵活的实现方式[7-9]。

本文设计了一种短距离相干电外差激光雷达测速系统。该系统采用双平行马赫-曾德尔调制器（DPMZM）实现光载射频调制，通过平衡探测器获取回波光与本振光的相干拍频信号，并利用软件无线电（SDR）完成 I/Q 正交解调和频谱分析[10]。在此基础上，推导 SDR 输入、输出信号的信噪比关系，并通过风扇测速实验验证系统可行性。

1　系统结构与原理

1.1　相干电外差激光雷达系统架构

本文设计的短距离相干电外差激光雷达系统主要由激光模块、DPMZM 调制模块、光学收发模块、相干探测模块、平衡探测模块和 SDR 数字处理模块组成，系统结构如图 1 所示。

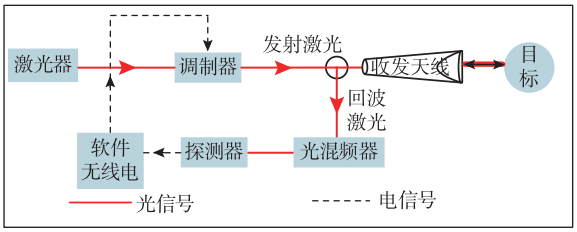


图 1　短距离相干激光雷达原理图

系统采用 1 550 nm 窄线宽连续波光纤激光器作为光源。激光经分束器后分为两路：一路作为本振光直接进入相干接收模块；另一路作为信号光输入 DPMZM 调制器。SDR 输出两路同相正交射频信号，用于驱动 DPMZM，对信号光进行光载射频调制。调制后的信号光经掺铒光纤放大器放大后，由收发一体光学天线发射至运动目标。目标反射回波携带多普勒频移信息，经接收天线耦合后与本振光在光混频器中发生相干混频[11-13]。光混频器输出的两路相位差为 90°的组合光进入平衡探测器，平衡探测器滤除直流分量并输出交流拍频信号。该拍频信号输入 SDR 接收端，经正交解调、低通滤波和频谱分析后得到目标速度信息。

与传统独立射频源和高速采集卡组合方式相比，该结构利用 SDR 同时承担射频信号产生和拍频信号处理功能，有利于简化系统链路，并提高调制频率、采样率和信号处理方式的可配置性。

1.2　DPMZM 调制模型

连续波激光器输出光场可表示为：

$$E_0(t)=E_0\exp(j\omega_0 t) \tag{1}$$

式中，E_0 为光场幅度，ω_0 为激光角频率。经分束器后，信号光进入 DPMZM。SDR 输出的两路正交射频信号分别加载至 DPMZM 的两个子调制臂，用于实现光载射频调制。通过调节 DPMZM 偏置电压，可抑制光载波分量并增强目标频移信息所在的边带分量。经 DPMZM 调制后的信号光可表示为：

$$E_s(t)=A_s J_1(m)\exp[j(\omega_0+\omega_m)t+\varphi_m] \tag{2}$$

式中，A_s 为调制后光场幅度，$J_1(\cdot)$ 为第一类一阶贝塞尔函数，m 为调制指数，ω_m 为射频调制角频率，φ_m

为调制相位[14]。实际推导中可根据DPMZM偏置状态和调制方式保留主要边带项。本文重点关注SDR输入输出信号的信噪比变化，因此在理论分析中主要讨论正频率分量。

信号光照射运动目标后，回波光因目标径向运动产生多普勒频移，其光场可表示为：

$$E_r(t)=A_r\exp[j(\omega_0+\omega_m+\omega_d)t+\varphi_r] \quad (3)$$

式中，A_r为回波光场幅度，ω_d为目标运动引起的多普勒角频移，φ_r为回波相位。

1.3 平衡相干探测与测速原理

本振光场可表示为：

$$E_{LO}(t)=A_{LO}\exp(j\omega_0 t) \quad (4)$$

回波光与本振光在光混频器中发生相干混频，随后进入平衡探测器。平衡探测器输出电流与两路光场的干涉项相关，去除直流分量后，其交流分量可写为：

$$i(t)=A\cos[(\omega_m+\omega_d)t+\varphi]+n(t) \quad (5)$$

式中，A为拍频信号幅度，ω_m为SDR射频调制角频率，φ为合成相位，$n(t)$为系统噪声[15]。该信号即为SDR接收端输入信号。

目标径向速度与多普勒频移之间满足：

$$v=\frac{1}{2}\lambda f_d \quad (6)$$

式中，v为目标径向速度，λ为激光波长，f_d为多普勒频移。当系统存在射频调制频率时，实际频谱峰值包含调制频率与多普勒频移分量，需要根据系统频率配置从拍频频率中提取f_d。

1.4 SDR正交解调原理

平衡探测器输出的实值拍频信号进入SDR后，与SDR内部产生的两路正交本振信号分别混频[16]。设输入信号为：

$$x(t)=A\cos[(\omega_m+\omega_d)t+\varphi]+n(t) \quad (7)$$

SDR内部正交本振信号分别为$\cos(\omega_m\cdot t)$、$-\sin(\omega_m\cdot t)$，混频并经低通滤波后得到同相分量和正交分量：

$$I(t)=2A\cos(\omega_d\cdot t+\varphi)+nI(t) \quad (8)$$

$$Q(t)=2A\sin(\omega_d\cdot t+\varphi)+nQ(t) \quad (9)$$

由此可构造复数基带信号：

$$z(t)=I(t)+jQ(t)=2A\exp[j(\omega_d\cdot t+\varphi)]+nz(t) \quad (10)$$

复数基带信号同时保留幅度和相位信息，能够避免实信号频谱中正负频率对称带来的混叠问题，有利于后续目标频率估计和滤波处理。

2 信噪比特性分析

2.1 平衡探测器输出信号模型

相干探测激光雷达回波功率可由激光雷达方程描述：

$$P_r=R^2P_t\cdot\eta_t\cdot\eta_r\cdot\lambda\beta V \quad (11)$$

式中，P_r为接收回波功率，P_t为发射光功率，η_t和η_r分别为发射和接收光学效率，β为后向散射系数，V为有效探测体积，R为探测距离[17]。

在相干探测系统中，信噪比可表示为信号功率与噪声功率之比：

$$R_{SN}=P_s/P_n \quad (12)$$

平衡探测器输出噪声主要包括散粒噪声、热噪声和相对强度噪声。设平衡探测器响应度为R_d，本振光功率为P_{LO}，系统等效噪声带宽为B，负载电阻为R_L，则散粒噪声功率可表示为：

$$P_{shot}=2qR_dP_{LO}BR_L \quad (13)$$

式中，q为电子电荷。热噪声功率为：

$$P_{thermal}=4kTBR_L \quad (14)$$

式中，k为玻尔兹曼常数，T为绝对温度。相对强度噪声功率可表示为：

$$P_{RIN}=R_LR_d^2P_{LO}^2N_{RI}\cdot B \quad (15)$$

因此，系统总噪声功率为：

$$P_n=P_{shot}+P_{thermal}+P_{RIN} \quad (16)$$

平衡探测器输出信号作为SDR输入信号，其输入信噪比可写为：

$$R_{SN\text{-}in}=P_{s,in}/P_{n,in} \quad (17)$$

2.2 SDR复数基带转换信噪比分析

SDR对输入实值拍频信号进行正交解调，输出复数基带信号。复信号功率应按同相分量和正交分量的平均功率之和计算，因此输出信号功率为：

$$P_{s,out}=E[|z_s(t)|^2]=E[I_s^2(t)+Q_s^2(t)] \quad (18)$$

在理想正交解调条件下，I/Q两路信号幅度一致、相位严格正交，则：

$$P_{s,out}=\frac{1}{2}P_{s,in} \quad (19)$$

相应地，输入噪声经I/Q两路混频和低通滤波后分配至同相与正交两路。若假设噪声为加性高斯白噪声，且I/Q两路噪声统计独立，则输出噪声功率为：

$$P_{n,out}=\frac{1}{2}P_{n,in} \quad (20)$$

因此，SDR输出信噪比为

$$R_{\mathrm{SN\text{-}out}}=\frac{P_{\mathrm{s,out}}}{P_{\mathrm{n,out}}}=\frac{P_{\mathrm{s,in}}/2}{P_{\mathrm{n,in}}/2}=R_{\mathrm{SN\text{-}in}} \tag{21}$$

由此可知，在理想正交解调、I/Q通道幅相一致、低通滤波器理想且量化噪声可忽略的条件下，SDR将平衡探测器输出的实值拍频信号转换为复数基带信号后，理论信噪比保持不变[18]。该过程虽然不直接提高信噪比，但复数基带信号能够完整保留幅度和相位信息，有利于频谱分离、数字滤波、相干积累和高精度频率估计。

需要说明的是，上述结论建立在理想正交解调条件下。在实际系统中，SDR本振相位噪声、ADC采样抖动、量化噪声、I/Q幅度不平衡、正交相位误差以及DPMZM偏置漂移均可能影响输出频谱质量。当I/Q两路存在幅相不一致时，复数基带信号中可能出现镜像分量，导致频谱旁瓣增强或目标频率估计误差增大。因此，在实际系统设计中，需要通过I/Q校准、偏置控制、合理设置采样率和带宽、优化滤波器参数等方式降低非理想因素对测速结果的影响[19-22]。

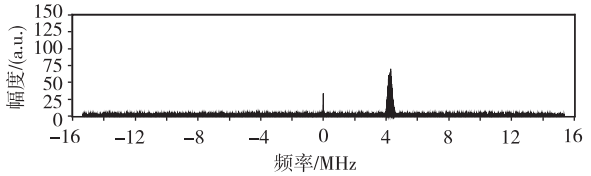
3　仿真结果分析

实验中，风扇叶片作为短距离运动目标，其反射回波携带叶片运动会引起多普勒频移。平衡探测器输出的拍频信号经SDR正交解调后得到复数基带信号，通过FFT可获得目标频谱分布，频谱峰值对应目标运动引起的多普勒频移分量。根据峰值频率与系统调制频率之间的关系，可提取目标多普勒频移f_{d}，进而通过式(6)计算目标径向速度。参数设置如表1所示，经过对风扇扇叶每一档转速以及正反向10次独立重复实验，证明该实验方法的可行性。

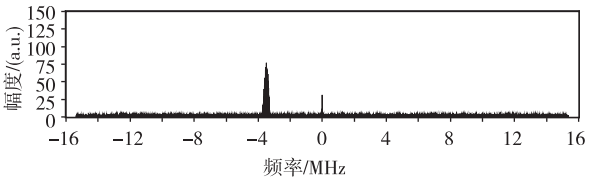
表1　参数设置

信号参数	数值
激光中心波长/nm	1 550
DPMZM半波电压/V	1.2
射频中心频率/MHz	30.72
采样间隔/s	1
天线直径/mm	40
激光脉冲宽度/ms	1

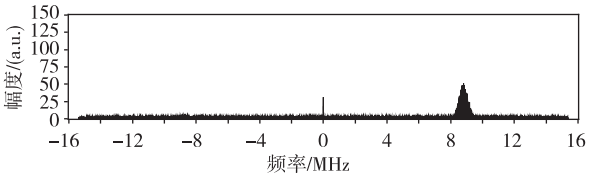
图2给出了不同状态下采集信号的频谱结果。从频谱图可以看出，目标运动时信号频谱中出现明显峰值，表明系统能够有效提取目标运动引起的频移信息。与原始实值拍频信号相比，经SDR正交解调后的复数基带信号便于进行正频率分量分析，有利于减少负频率镜像对频率估计的影响。实验中射频信号的中心频率为30.72 MHz，通过对旋转的风扇扇叶测量得到不同档位下旋转过程中产生的风速速度，而根据多普勒频移的特性还能得到风扇正转与反转的信息。图2(a)为风扇第1档正转所采集测得的信号频谱，图2(b)为风扇第1档反转所采集测得的信号频谱，峰值处便是所测得的正负多普勒频移信号，而中心便是迁移频率后所产生的射频串扰。风扇在不同档位风速不同，所得到的信号频谱也不同，如图2(c)所示便是不同档位下信号的频谱图。



(a) 第1档正转



(b) 第1档反转



(c) 第4档正转

图2　风扇在不同档位下采集信号的多普勒频谱

为验证系统短距离测速的稳定性，对风扇不同档位分别进行10次数据采集。以正转第4档风扇为例，根据10次采集结果计算对应风速，并绘制测速结果折线图，如图3所示。由图可见，第4档风扇速度测量结果主要分布在6.7～6.9 m/s范围内，说明系统能够较稳定地提取运动目标的多普勒频移信息。该结果初步验证了相干电外差探测结合SDR正交解调用于短距离测速的可行性。

理论分析表明，SDR正交解调在理想条件下不会改变系统信噪比。实验中，SDR的主要作用并不是直接提高信噪比，而是将实值拍频信号转换为复

数基带信号，使信号幅度、相位和频率信息得到完整保留。复数基带信号具有单边频谱表达能力，能够降低正负频率对称分量对频率估计的影响，并便于后续采用数字滤波、相干积累和高精度频率估计算法。

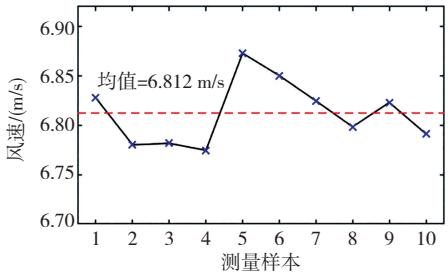


图3 第4档10次风速测量结果

4 结论

本文设计并验证了一种短距离相干电外差激光雷达测速系统。系统采用DPMZM实现光载射频调制，通过平衡相干探测获得回波光与本振光的拍频信号，并利用SDR完成射频信号产生、数据采集、I/Q正交解调和频谱分析。该结构将光学相干探测与数字正交解调相结合，提高了短距离测速系统的参数配置灵活性和后端信号处理能力；建立了SDR输入实值拍频信号与输出复数基带信号之间的信噪比模型。理论分析表明，在理想正交解调、I/Q通道幅相一致、低通滤波器理想且量化噪声可忽略的条件下，SDR复数基带转换过程不引入额外信噪比损失。虽然该过程不直接提升信噪比，但复数基带信号能够保留幅度和相位信息，便于后续频率估计、滤波处理和相干积累。搭建的短距离测速实验系统以风扇叶片为运动目标进行了验证。实验结果表明，系统能够稳定提取目标多普勒频移信息，说明所提方法具备短距离测速应用的可行性。

需要指出的是，本文实验仍以系统可行性验证为主，尚未系统分析不同距离、不同目标反射率和不同信噪比条件下的测速误差。后续工作将引入标准风速仪、转速计或精密运动平台作为参考，进一步开展测量误差、距离适应性、I/Q幅相不平衡和抗干扰性能测试，以完善系统性能评价。

参考文献：

[1] 潘时龙，张亚梅．微波光子雷达及关键技术[J]．科技导报，2017，35(20)：36-52.
Pan Shilong, Zhang Yamei. Microwave photonic radar and key technologies [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(20): 36-52.

[2] 章令杰．微波光子雷达信号产生及接收关键技术研究[D]．成都：电子科技大学，2022.
Zhang Lingjie. Research on key technologies of signal generation and reception for microwave photonic radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.

[3] Salguero-Luna S A, Ramírez-Gutiérrez K A, Martínez-Cruz A. A state-of-the-art review on attacks and defense mechanisms for LiDAR on autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(1): 22-42.

[4] Hecht J. Lidar for self-driving cars [J]. Optics and Photonics News, 2018, 29(1): 26-33.

[5] Zhang Z, Shirahata T, Chen R, et al. Ranging disambiguation of LiDAR using chirped amplitude-modulated phase-shift method[J]. Optics Express, 2023, 31(16): 1-8.

[6] 吴 格，赵一鸣，马勋鹏，等．多普勒测风激光雷达风廓线探测精度对比分析[J]．遥测遥控，2023，44(3)：86-97.
Wu Ge, Zhao Yiming, Ma Xunpeng, et al. Comparative analysis of wind profile detection accuracy of Doppler wind lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 86-97.

[7] 张博华，杜 军，张元生．用于高速目标测量的射频(微波)相位调制激光雷达技术[J]．电光与控制，2025，32(7)：86-91.
Zhang Bohua, Du Jun, Zhang Yuansheng. A radio frequency (microwave) phase modulated lidar technology for high-speed target measurement[J]. Electronics Optics & Control, 2025, 32(7): 86-91.

[8] 杨 羽，薛 玮，陈珊珊，等．基于南京站的相干多普勒测风激光雷达性能验证研究[J]．科学技术创新，2026(1)：71-74.
Yang Yu, Xue Wei, Chen Shanshan, et al. Research on performance validation of coherent Doppler wind lidar [J]. Scientific and Technological InnovationInformation, 2026(1): 71-74.

[9] 周航宇，晋周祥，吴思颐，等．短距离直接探测偏振波分复用UWOC系统设计[J]．激光与光电子学进展，2026，63(5)：387-397.
Zhou Hangyu, Jin Zhouxiang, Wu Siyi, et al. Design of polarization and wavelength division multiplexing based short-range direct-detection underwater wireless optical communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2026, 63(5): 387-397.

[10] 骆建康．基于相干测风激光雷达的风矢量探测研究[D]．济南：山东师范大学，2025.
Luo Jiankang. Research on wind vector detection based on coherent wind lidar[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2025.

[11] 孙 灿，王 豫，刘晓英，等．不同云雾和降水条件下相干多普勒测风激光雷达探测性能分析[J]．大气与环境光学学报，2025，20(3)：312-324.

Sun Can, Wang Yu, Liu Xiaoying, et al. Performance analysis of coherent Doppler wind lidar detection under different cloud and precipitation conditions [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2025, 20(3): 312-324.

[12] 吴柯南. 相干激光雷达在混合云相探测中的应用与研究[D]. 合肥：中国科学技术大学, 2024.
Wu Kenan. Application and research ofcoherent lidar in mixed-phasecloud detection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.

[13] 金效梅, 朱文越, 刘　庆. 激光相干测风技术应用研究[J]. 大气与环境光学学报, 2020, 15(3): 161-173.
Jin Xiaomei, Zhu Wenyue, Liu Qing. Application research of laser coherent wind technology [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020, 15(3): 161-173.

[14] Jiang W, Tan Q, Qin W, et al. A linearization analog photonic link with high third-order intermodulation distortion suppression based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 7902208.

[15] 周艳宗, 王　冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 56-59.
Zhou Yanzong, Wang Chong, Liu Yanping, et al. Research progress and application of coherent wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 56-59.

[16] 刘小天, 罗林昇, 李　江, 等. 基于软件无线电的探侦多功能雷达系统设计[J]. 空间电子技术, 2025, 22(3): 60-69.
Liu Xiaotian, Luo Linsheng, Li Jiang, et al. Design of a software-defined multifunction radar system [J]. Space Electronic Technology, 2025, 22(3): 60-69.

[17] 高　龙, 王春晖, 李彦超, 等. 1.55 μm相干激光测风雷达平衡式探测接收实验[J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1064-1069.
Gao Long, Wang Chunhui, Li Yanchao, et al. Investigation of balanced detection and receiver for 1.55 μm coherent wind lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(6): 1064-1069.

[18] 王希涛, 刘秉义, 吴松华, 等. 高精度1.55 μm全光纤激光相干测速实验及数据分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 8-12.
Wang Xitao, Liu Bingyi, Wu Songhua, et al. 1.55 μm all-fiber laser heterodyne detection and data analysis with high measurement accuracy of velocity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 8-12.

[19] Chen W, Wen A, Li X, et al. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction discrimination based on a DPMZM[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-8.

[20] Wang R, Chen L, Zhao Y, et al. A high signal-to-noise ratio balanced detector system for 2 μm coherent wind lidar [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 073101.

[21] 王梓宇, 李建平, 李　宁. 一种基于GPU的软件无线电信号并行分离技术研究和实现[J]. 中国无线电, 2025(3): 55-58.
Wang Ziyu, Li Jianping, Li Ning. Research and implementation of signal parallel separation of software radio based on GPU[J]. China Radio, 2025(3): 55-58.

[22] 曹启鹏, 李永昌, 董小静, 等. 卫星微振动对测风激光雷达信噪比影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 204-209.
Cao Qipeng, Li Yongchang, Dong Xiaojing, et al. Influence of satellite micro-vibrationon signal-to-noise ratio of wind LiDAR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 204-209.

作者简介：

王子文(2001—)，女，辽宁省海城市人，硕士研究生，主要研究方向为激光雷达；

白　岩(1982—)，男，黑龙江省东宁人，博士，副教授，硕士研究生导师，主要研究方向为光电检测技术。